Jb. Nass. Ver. Naturk. **116** S. 81–101 8 Abb. 5 Tab. Wiesbaden 1995

Fluviatile Schwermetalleinträge in die Rheinaue des Hessischen Rieds und ihre Bewertung

ULRICH DEHNER

Kurzfassung: In Böden der holozänen Rheinaue des Hessischen Rieds werden die Schwermetallgehalte von As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn gemessen. Ziel der Untersuchung ist zunächst die Ermittlung der Schwermetallverteilung in den Bodenprofilen und im Auenquerschnitt.
Als bodenkundliche Kenndaten werden zusätzlich die Korngrößenverteilung, der Gehalt an organischer Substanz sowie der Carbonatgehalt gemessen. Diese Daten dienen als Hintergrundinformation für die Beurteilung der Bindungsstärke und somit Pflanzenverfügbarkeit. Abschließend wird eine Bewertung der Belastungssituation aufgrund bestehender Grenz- und Richtwerte sowie eine Bilanzierung geogener und anthropogener Schwermetallgehalte vorgenommen.

Inhalt

1. Einleitung

Zu Beginn des Jahres 1995 ist die Hochwasserproblematik zum wiederholten Male in die Schlagzeilen gerückt. Durch das Ansteigen der Pegel des Rheins und seiner Nebenflüsse wurden weite Teile der Auengebiete überflutet. Eng verbunden mit dem Auftreten von Hochwasser ist ein zunehmender Sediment- und damit Schadstofftransport in die Überflutungsräume. Untersuchungen am Niederrhein belegen, daß hier bereits weite Teile der Rheinaue durch einen fluviatilen Eintrag von Schwermetallen belastet sind (SALAMONS, DE GROOT 1979, CLAUSSEN 1983, KÖNIG & KRÄMER 1985, JAPENGA et al. 1990). Über Schwermetallkonzentrationen in den Böden der Auengebiete am nördlichen Oberrhein ist bisher wenig bekannt. Hier

liegen nur punktuelle Bodenuntersuchungen vor (MÜLLER & YAHYA 1992, THIEMEYER 1989), die keine allgemeine Aussage über die Belastungssituation der Rheinaue zulassen.

2. Methodik

Es wurden insgesamt 18 Profile bis in eine Tiefe von 190 cm beprobt. Die Profilansprache erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Arbeitsgruppe Bodenkunde 1982). Die Bodenproben wurden horizontweise entnommen, wobei mächtigere Horizonte in 20-Zentimeter-Abschnitte unterteilt wurden.

Ermittelt wurden die Schwermetallgehalte von Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Zink (Zn). Die Messung der Schwermetalle erfolgte nach Feinmahlung der Bodenprobe und Königswasseraufschluß mit AAS.

Die Bestimmung von Cadmium wurde mit Deuterium-Kompensation vorgenommen. Arsen wurde nach einem Verfahren des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung mit AAS-Hydridtechnik gemessen.

Nach SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1989) werden mit dem hier angewendeten Verfahren (Mahlung des Probenmaterials und Königswasseraufschluß) mehr als 90 % der Schwermetallgesamtgehalte erfaßt. Die als unlöslicher Rest verbleibenden Minerale, im wesentlichen Quarz und verwitterungsstabile Schwerminerale, enthalten i.d.R. nur noch geringe Schwermetallgehalte lithogenen Ursprungs (BLUME 1990).

Neben den Schwermetallgehalten wurden als bodenkundliche Kenndaten der pH-Wert (KCl), der Gehalt an organischer Substanz, der Carbonatgehalt (nach SCHEIBLER) sowie die Korngrößenverteilung (KÖHNsche Pipettmethode) bestimmt.

3. Das Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurde ein Ausschnitt der holozänen Rheinaue südlich von Gernsheim gewählt, da hier auf engstem Raum ein Großteil der in der nördlichen Oberrheinebene vorkommenden Bodenformen repräsentiert ist. Das ca. 7,5 km^2 große Areal liegt südlich von Gernsheim zwischen dem Rheinufer und der Niederterrasse.

Nach SCHARPFF (1977) kann die holozäne Rheinaue in verschieden alte Mäandersysteme gegliedert werden. Durch die Erstellung der Bodenkarte der nördlichen Oberrheinebene (WEIDNER 1990) war es möglich die von SCHARPFF erstellte Gliederung der Rheinaue bei Worms teilweise auf das Untersuchungsgebiet zu übertragen.

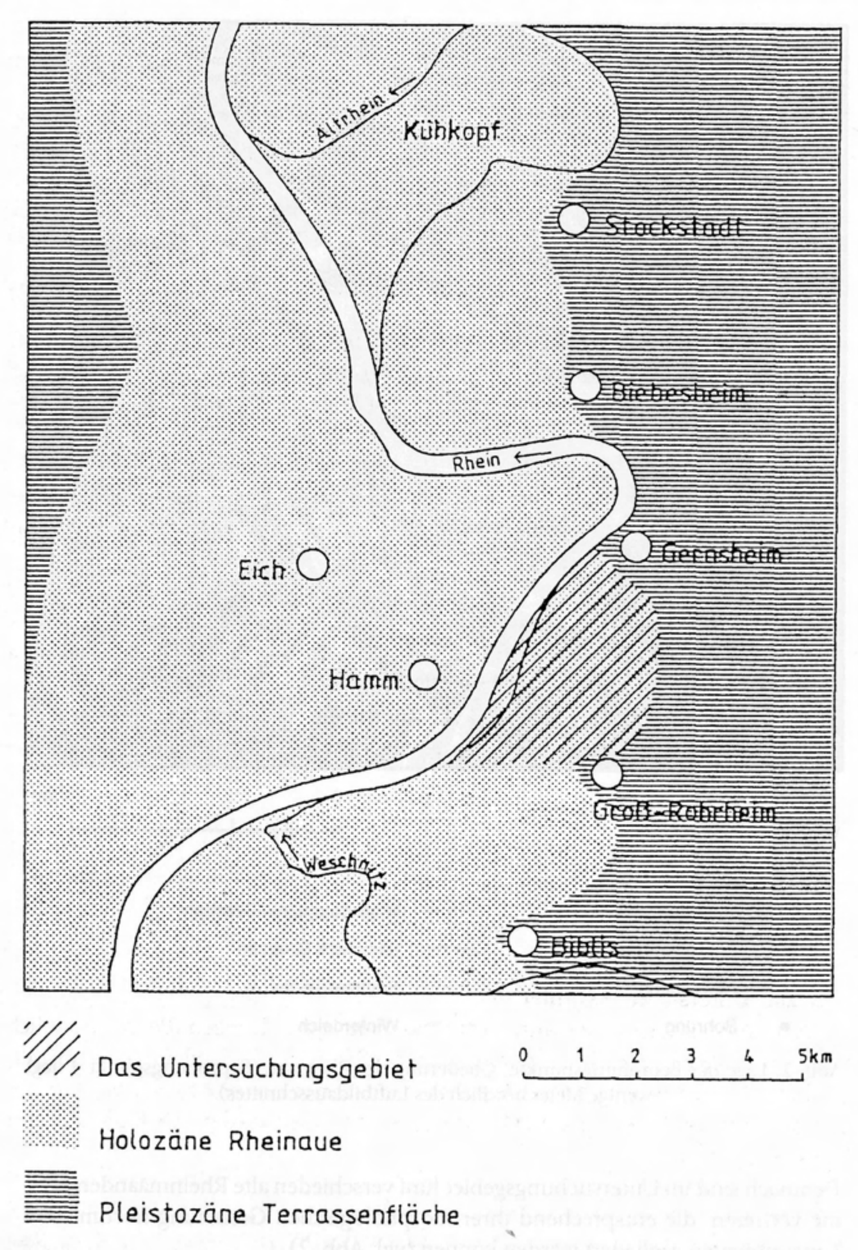


Abb. 1. Lage des Untersuchungsgebietes.

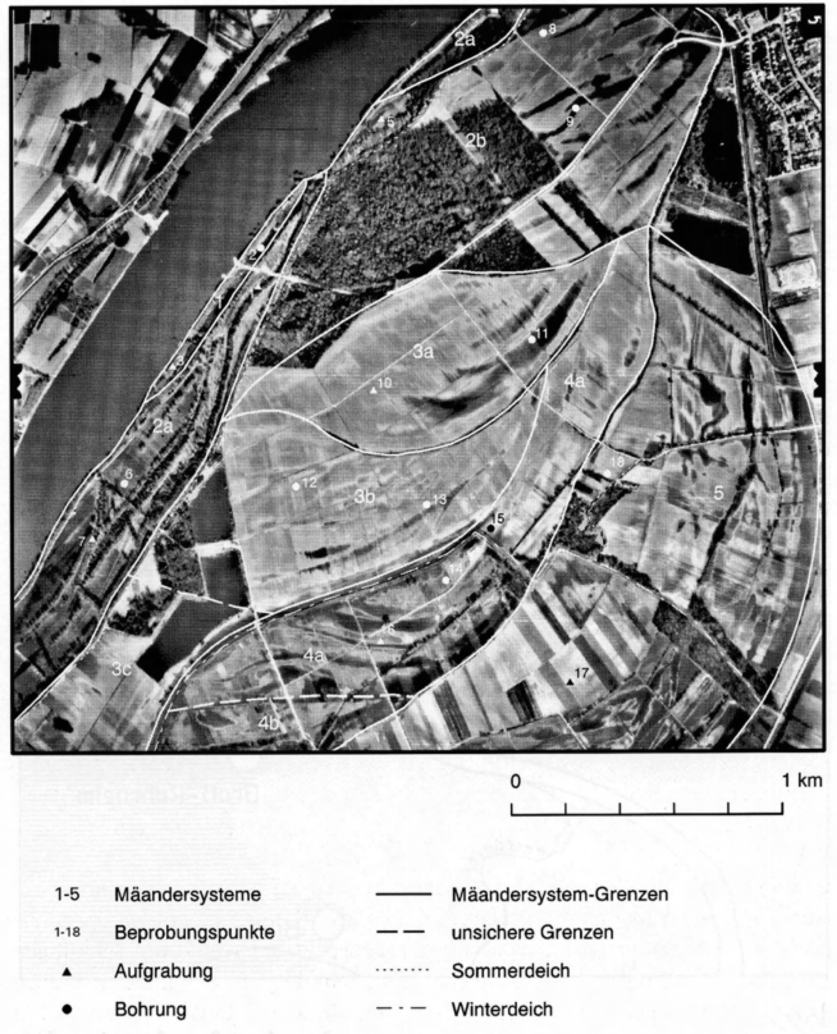


Abb. 2. Lage der Beprobungspunkte, Gliederung der Rheinaue (Beprobungspunkt 4 liegt wenige Meter nördlich des Luftbildausschnittes).

Demnach sind im Untersuchungsgebiet fünf verschieden alte Rheinmäandersysteme vertreten, die entsprechend ihrer morphologischen Gestaltung nochmals in Untereinheiten gegliedert werden können (vgl. Abb. 2).

Das Luftbild wurde als Grundlage von Abb. 2 gewählt, da hier besonders gut die verschiedenen Strukturen der Rheinaue sichtbar werden. Der Befliegungszeitraum

war zwischen dem 16. und 22.4.1988. Noch 2 bis 3 Wochen zuvor wurde bei Hochwasserständen von 7,15 m bis 7,26 m (Pegel Gernsheim) die gesamte Rheinaue bis zum Winterdeich überflutet. Zum Zeitpunkt der Aufnahme lagen die Pegelstände des Rheins um 4 m.

Deutlich zu sehen sind die verschiedenen Grautöne der unterschiedlich durchfeuchteten Flächen. Sie kennzeichnen die morphologischen Einheiten der Rheinaue, welche durch Sedimentationsvorgänge eines mäandrierenden Flußlaufes entstanden.

Die dunklen Grautöne markieren die gut durchfeuchteten, tiefer gelegenen Bereiche, die ehemaligen Flußrinnensysteme. Die höher gelegenen Geländeteile, die Rücken, werden von Sedimenten gebildet, die bei größerer Wasserführung abgelagert wurden. Sie sind schlechter durchfeuchtet und damit trockener, was durch die helleren Grautöne sichtbar wird.

Die Entstehung der Rheinmäandersysteme reicht vom frühen Holozän bis in die heutige Zeit. Die zeitliche Einordnung ist zur Zeit noch unsicher und nicht in allen Fällen eindeutig geklärt. Sicher datiert ist das jüngste Mäandersystem, da es aufgrund des Buhnenbaus gegen Ende des 19. Jahrhunderts entstanden ist (SPIESS 1951). Bei der zeitlichen Einordnung der anderen Rheinmäandersysteme ergeben sich Hinweise nach SCHARPFF (1977), THIEMEYER (1989a) sowie ZAKOSEK (1962).

Den fünf verschieden alten Mäandersystemen können bestimmte Bodenformen zugeordnet werden (WEIDNER 1990, THIEMEYER 1989a). Vertreten sind Braune Auenböden mit Übergängen bis zum Auengley sowie Auenpelosole und Auentschernoseme.

Grundsätzlich zeigt sich bei allen Bodenprofilen eine Zweigliederung, indem ein Auenlehm einen Auensand überlagert. Örtlich ist die Auenlehmdecke in unterschiedliche Lagen gegliedert. Das Korngrößenspektrum reicht von schluffigen Lehmen in den jüngsten Auenbereichen über schluffig-tonige Lehme, schluffige Tone und stark sandige Lehme in den frühholozänen Mäandersystemen. Die Mächtigkeit der Auenlehmdecke beträgt in Abhängigkeit von der Reliefposition wenige Dezimeter bis zu mehr als zwei Meter. Die größten Mächtigkeiten treten in ehemaligen Flußrinnensystemen auf.

In Tab. 1. wird eine Übersicht über die im Untersuchungsgebiet verbreiteten Bodentypen, ihre Entstehungszeit sowie über die wichtigsten bodenkundlichen Merkmale gegeben.

Neben den bodenkundlichen Einheiten können in der Rheinaue verschiedene Überflutungsbereiche unterschieden werden.

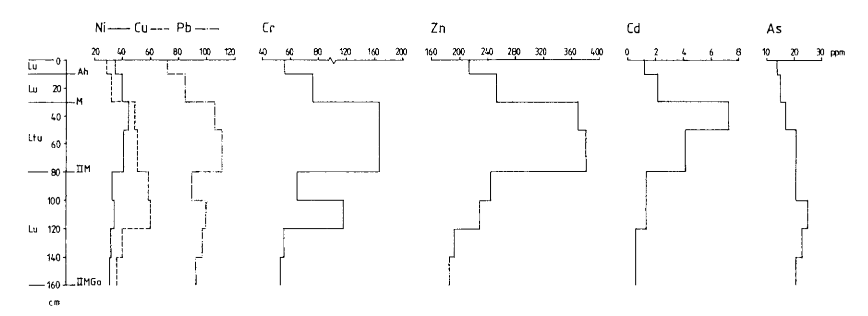


Abb. 3. Tiefenverteilung der Schwermetalle in einem Braunen Auenboden aus schluffigem bis schluffig-tonigem Auenlehm (Beprobungspunkt 3, R: 346058, H: 551256).

Dies ist ein für die Verteilung von Schwermetallen wichtiger Aspekt, da in den unterschiedlich häufig überfluteten Bereichen mit einem differierenden fluviatilen Schwermetalleintrag zu rechnen ist.

Im Untersuchungsgebiet sind zwei Dammsysteme unterschiedlichen Alters vorhanden (vgl. Abb. 2). Der Bau des Winterdamms geht auf das 17. Jahrhundert zurück. Seine Kronenhöhe liegt bei 91 m ü.NN. (Der Nullpunkt Pegel Gernsheim liegt bei 82,386 m). Die Errichtung des Sommerdamms in Rheinnähe erfolgte erst ab dem 18. bis ins 19. Jahrhundert. Er sollte die landwirtschaftlich genutzten Wiesen sowie die damals vorhandenen Lehmgruben vor sommerlichen Hochwassern schützen. Seine Dammkrone liegt zwischen 89,5 und 90,5 m ü.NN.

4. Die Verteilung der Schwermetalle in typischen Bodenprofilen

Abb. 3 zeigt die Verteilung von Schwermetallen im jüngsten Mäandersystem des Rheins. Deutlich zeichnet sich ein Anstieg der Schwermetallgehalte im Profilbereich zwischen 30 und 80 cm. Verbunden ist dies mit einer Zunahme des Tongehaltes innerhalb des M-Horizontes von 24,2 auf 35,2 %.

Am auffälligsten sind die Konzentrationsanstiege bei den Schwermetallen Blei, Chrom, Zink und Cadmium ausgeprägt. Nickel, Kupfer und Arsen sind dagegen gleichmäßiger verteilt.

Da die Bereiche zwischen den Buhnen jährlich mindestens einmal überflutet werden, kann davon ausgegangen werden, daß innerhalb des Bodenprofils eine nahezu lückenlose Abfolge der Sedimente seit dem Buhnenbau vorhanden ist. Die Verteilung der Schwermetalle spiegelt somit eine Abfolge unterschiedlich hoch belasteter Rheinsedimente vom Ende des 19. Jahrhunderts bis in die heutige Zeit wieder. Eine exakte zeitliche Einordnung der einzelnen Sedimentations- und somit Belastungsphasen ist mangels genauerer Datierung nicht möglich. Es können je-

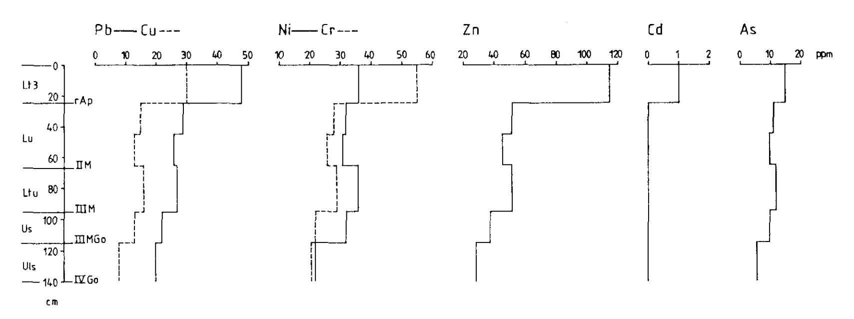


Abb. 4. Tiefenverteilung der Schwermetalle eines Braunen Auenbodens aus schluffigem bis schluffig-tonigem Auenlehm über Auensand (Beprobungspunkt 5, R: 346124, H: 551201).

doch Parallelen zu den Untersuchungen von MÜLLER (1988) gezogen werden, der durch den Vergleich von Schwermetallgehalten in Sedimentproben aus den 70er und 80er Jahren eine deutliche Verminderung der Sedimentbelastung feststellen konnte. Innerhalb des vorgestellten Profils zeigt sich eine ähnliche Tendenz, da die oberen, jüngeren Profilbereiche geringere Schwermetallgehalte aufweisen als tiefer gelegene Profilabschnitte.

Ein Großteil der Fläche von Mäandersystem 2 befindet sich im Untersuchungsgebiet vor dem Sommerdamm. Abb. 4 zeigt die Schwermetallverteilung in einer weit verbreiteten Bodenform.

Deutlich wird eine Anreicherung der Schwermetalle im Oberboden, wobei die Verteilungskurven von Blei, Kupfer, Nickel, Chrom und Zink nahezu parallel verlaufen.

Arsen ist im Gegensatz zu den anderen Schwermetallen relativ gleichmäßig im Profil verteilt.

Die erhöhte Konzentration der Schwermetalle im Oberboden steht in Verbindung mit einem Anstieg des Tongehaltes im rAp-Horizont (35,7 % gegenüber 30,5 %). Offenbar kommt dies dadurch zustande, daß bei Hochwasser die feinkörnigen Sedimentanteile durch den dichten Pflanzenbewuchs ausgekämmt und somit zur Ablagerung gebracht werden.

Ein weniger differenziertes Bild zeigt die Tiefenverteilung der Schwermetalle in Abb. 5, einem Auenpelosol-(Brauner) Auenboden aus verschiedenen Hochflutlehmen über Auensand, welcher hinter dem Sommerdeich und somit außerhalb der regelmäßig überfluteten Auenzone liegt. Nur die Schwermetalle Blei, Kupfer und Cadmium sind geringfügig im Oberboden angereichert. Nickel und Chrom sind in unteren Profilteilen höher konzentriert.

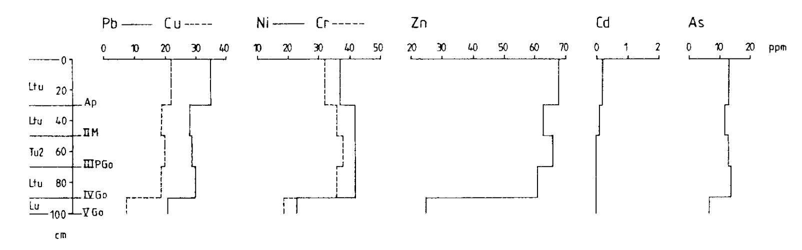


Abb. 5. Tiefenverteilung der Schwermetalle in einem Auenpelosol-(Brauner) Auenboden aus verschiedenen Hochflutlehmen über Auensand (Beprobungspunkt 10, R: 346138, H: 551093).

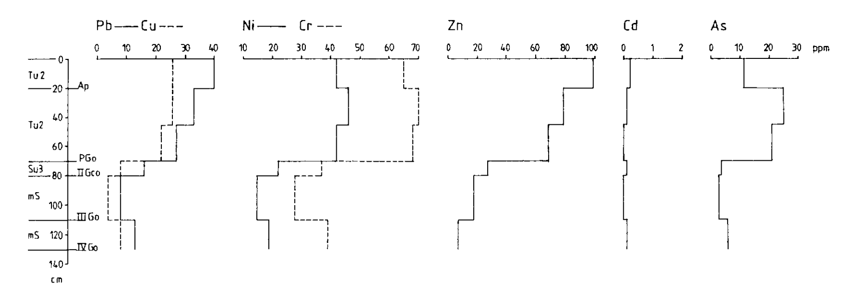


Abb. 6. Auenpelosol-Auengley aus schluffigem Ton über Rheinweiß über Auensand (Beprobungspunkt 16, R: 346152, H: 550988).

In dem hinter dem Winterdamm gelegenen Auenpelosol-Auengley (vgl. Abb. 6) wird eine deutliche Schichtung erkennbar. Auffällig heben sich die Schwermetallgehalte des stark tonigen Auenlehms (63 % Tongehalt) gegenüber den sandigen Profilteilen ab. Arsen tritt relativ zu den anderen Profilen in hohen Konzentrationen auf.

Der Graue Auentschernosem (vgl. Abb. 7) liegt ebenfalls hinter dem Winterdamm, also außerhalb des rezenten Überflutungsbereiches des Rheins. Hier nehmen abgesehen von Nickel und Chrom die Schwermetallgehalte mit zunehmender Tiefe ab.

5. Die Verteilung der Schwermetalle im Auenquerschnitt

Einen Überblick über die Verteilung der Schwermetalle im Auenquerschnitt gibt Abb. 8, in der die Ergebnisse von 18 Beprobungspunkten aufgenommen wurden (Lage der Beprobungspunkte im Untersuchungsgebiet vgl. Abb. 2).

Abb. 8 ist in zwei Abschnitte unterteilt. Der untere Abschnitt enthält Angaben über die topographische Lage der Beprobungspunkte (Entfernung zum Rhein, Höhenlage über NN), ihre Einordnung in die Mäandersysteme des Rheins sowie die Höhe

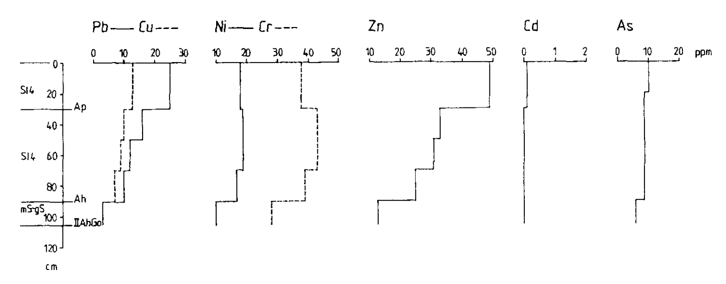


Abb. 7. Tiefenverteilung von Schwermetallen in einem Grauen Auentschernosem aus stark sandigem Auenlehm über Auensand (R: 346228, H: 550988).

der Rheinwasserstände. Der Sommerdamm ist ebenfalls entsprechend seiner Höhenlage eingezeichnet.

Der Winterdamm wurde nicht in die Darstellung aufgenommen. Da er im Untersuchungsgebiet nicht parallel zum Rhein verläuft, befinden sich die Punkte 15 und 18 vor und die Punkte 16 und 17 hinter dem Winterdamm.

Bei der Aneinanderreihung der Beprobungspunkte ist zu beachten, daß diese nicht in einer Linie liegen (vgl. Abb. 2), d.h. es handelt sich um eine künstlich erstellte Morphologie.

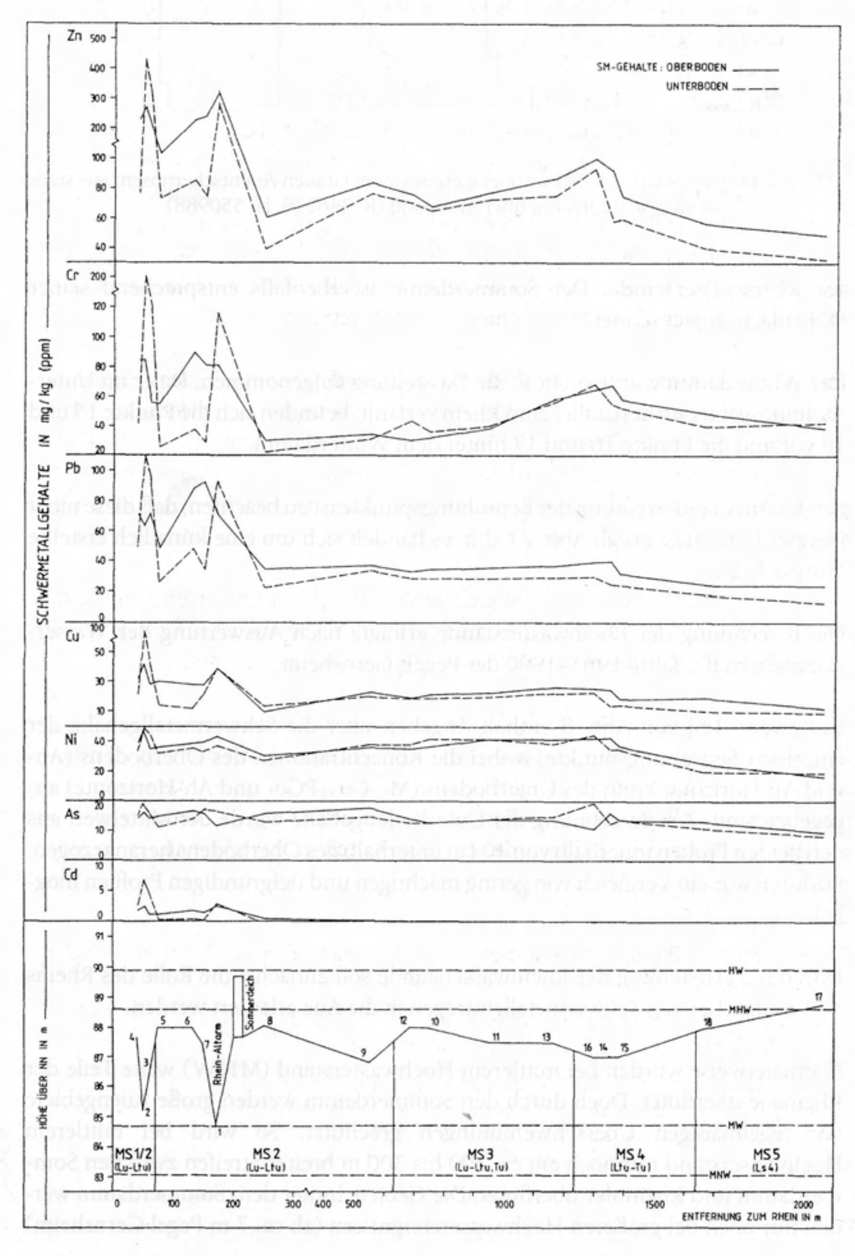
Die Berechnung der Rheinwasserstände erfolgte nach Auswertung der Wasserstandsdaten der Jahre 1981–1990 des Pegels Gernsheim.

Der zweite Teil von Abb. 8 enthält Angaben über die Schwermetallgehalte der einzelnen Beprobungspunkte, wobei die Konzentrationen des Oberbodens (Ah- und Ap-Horizonte) und des Unterbodens (M-, Go-, PGo- und Ah-Horizonte) angegeben sind. Zur Berechnung der Unterbodengehalte wurde der Mittelwert aus den beiden Proben innerhalb von 40 cm unterhalb des Oberbodens herangezogen. Dadurch war ein Vergleich von gering mächtigen und tiefgründigen Profilen möglich.

Durch die Darstellung der Rheinwasserstände soll zunächst die Rolle des Rheins als Verursacher von Schwermetalleinträgen in die Aue erläutert werden.

Normalerweise würden bei mittlerem Hochwasserstand (MHW) weite Teile der Rheinaue überflutet. Doch durch den Sommerdamm werden große Auengebiete vor regelmäßigen Überschwemmungen geschützt. So wird bei mittlerem Hochwasserstand nur noch ein ca. 200 bis 300 m breiter Streifen zwischen Sommerdamm und Rheinufer überflutet. Die Gebiete hinter dem Sommerdamm werden nur noch bei größeren Hochwasserereignissen (ab ca. 7 m Pegel Gernsheim)

überschwemmt. Dies war im Untersuchungsgebiet innerhalb der Jahre 1980 bis 1990 zweimal der Fall. Daraus geht hervor, daß seit dem 19. Jahrhundert ein Eintrag von möglicherweise belasteten Rheinsedimenten nur in eng begrenzten Auen-



bereichen stattfindet. Da die Gebiete hinter dem Sommerdamm vom Rhein nur selten überschwemmt werden, hat der Rhein hier wahrscheinlich nur eine geringe Bedeutung für den Eintrag von Schwermetallen. Hinter dem Sommerdamm ist somit in erster Linie mit einem Eintrag von Schwermetallen über die Atmosphäre und die Landwirtschaft zu rechnen.

Als Konsequenz aus den Überflutungshäufigkeiten ergibt sich der Verlauf der Kurven für die Schwermetallgehalte im Untersuchungsgebiet. Tendenziell treten bei allen Schwermetallen die Maximumgehalte vor dem Sommerdamm auf. Ferner sind zwischen den einzelnen Beprobungspunkten z.T. deutliche Unterschiede vorhanden. Hier macht sich die unterschiedliche Überflutungssituation durch den Rhein bemerkbar, so daß hauptsächlich tiefer gelegene Geländeteile wie z.B. der Rheinaltarm höher belastet sind, da sich hier unter lakustrischen Bedingungen die feinkörnigen, höher belasteten Sedimentanteile absetzen können.

Hinter dem Sommerdamm sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Beprobungspunkten geringer. Die Kurven der Ober- und Unterbodengehalte haben i.d.R. einen ausgeglicheneren Verlauf. Der Winterdamm scheint auf die Schwermetallgehalte in den Böden keinen oder nur einen sehr geringen Einfluß zu haben. Zwischen vergleichbaren Punkten (14, 15 und 16 sowie 17 und 18) bestehen keine signifikanten Unterschiede.

Nicht alle Schwermetalle zeigen das gleiche Verteilungsmuster. Arsen und Nickel sind im Auenquerschnitt relativ gleichmäßig verteilt. Die anderen Schwermetalle weisen deutliche Maxima in den Böden vor dem Sommerdamm auf.

Die einzelnen Schwermetalle:

Die Oberbodengehalte von **Cadmium** (Cd) vor dem Sommerdamm schwanken zwischen 2,5 und 1,0 ppm. Der Mittelwert beträgt 1,6 ppm. Die Maxima der Unterböden dagegen liegen zwischen 7 und 10 ppm. Hier kommt die bereits in Kap. 4 beschriebene Belastungssituation der jüngsten Bereiche der Rheinaue zum Ausdruck.

◀ Abb. 8. Schwermetallgehalte in der Rheinaue zwischen Rheinkilometer 457.5 und 461.5 in Abhängigkeit zur Höhenlage, Entfernung zum Rhein zur Überflutungssituation.

MS = Mäandersystem Lu = schluffiger Lehm Ltu = schluffig-toniger Lehm
Tu = schluffiger Ton Ls4 = stark sandiger Lehm

HW = höchster Wasserstand innerhalb der Jahre 1981–1990
MHW = Mittlerer Hochwasserstand der Jahre 1981–1990
MW = Mittlerer Wasserstand der Jahre 1981–1990
MNW = Mittlerer Niedrigwasserstand der Jahre 1981–1990

(Die Punkte 1–18 liegen nicht auf einer Linie, die Punkte 14, 16 und 18 liegen hinter dem Winterdamm.)

Hinter dem Sommerdamm sinken die Gehalte im Oberboden auf Werte zwischen 0,3 und 0,1 ppm. Die durchschnittlichen Cadmiumkonzentrationen in den Unterböden bleiben unter der Nachweisgrenze.

Arsen (As) ist im Auenquerschnitt relativ gleichmäßig verteilt. Dies drückt sich auch in dem Vergleich der Mittelwerte für die Oberbodengehalte aus. Sie ereichen vor dem Sommerdamm 14,8 ppm, dahinter 14,0 ppm. Die höchsten Werte wurden im Unterboden von Profil 16 gemessen, welches hinter dem Winterdamm lokalisiert ist. Somit spielt der Rhein für den Eintrag von Arsen in die Aue vermutlich keine bedeutende Rolle.

Nickel (Ni), das ein ähnliches Verteilungsmuster wie Arsen zeigt, tritt in den Oberböden vor dem Sommerdamm in Konzentrationen zwischen 35 und 48 ppm auf. Der mittlere Gehalt liegt bei 39,5 ppm. In den Oberböden hinter dem Sommerdamm sind die Gehalte mit durchschnittlich 35,4 ppm etwas niedriger.

Kupfer (Cu), mit einem ausgeprägten Maximum in Profil 2, hat in den Oberböden vor dem Sommerdamm eine durchschnittliche Konzentration von 32,4 ppm. Hinter dem Sommerdamm sind nur geringe Unterschiede zwischen den Gehalten im Oberboden und im Unterboden vorhanden. Der Mittelwert der Oberbodengehalte beläuft sich auf 20,3 ppm.

Die Konzentrationen von **Blei** (Pb) sind vor dem Sommerdamm deutlichen Schwankungen unterworfen. Die Oberbodengehalte bewegen sich zwischen 48 ppm (Profil 5) und 93 ppm (Profil 7). Im Mittel betragen sie 72,6 ppm. Hinter dem Sommerdamm haben sowohl Unterboden- als auch Oberbodengehalte einen nahezu parallelen Verlauf. Die Gehalte des Oberbodens liegen geringfügig über denen des Unterbodens, im Mittel bei 34 ppm.

Bei **Chrom** (Cr) tritt die Rolle des Rheins als Belastungsquelle noch deutlicher in Erscheinung als bei Blei. Die Maxima im Unterboden von Profil 2 erreichen Werte von mehr als 200 ppm. Der durchschnittliche Gehalt der Oberböden beträgt vor dem Sommerdamm 76,0 ppm, hinter dem Sommerdamm 45,8 ppm. Anders als bei den bis jetzt betrachteten Schwermetallen treten auch hinter dem Sommerdamm deutliche Schwankungen auf. So zeigen die Profile 14 bis 16 von Mäandersystem 4 eine deutliche Zunahme der Chromgehalte, und das sowohl im Unter- als auch im Oberboden.

Zink (Zn) ist das in der Rheinaue am höchsten konzentrierte Schwermetall. Der Einfluß des Rheins tritt hier sehr deutlich in Erscheinung. Vor dem Sommerdamm liegt die durchschnittliche Konzentration im Oberboden bei 232,4 ppm, dahinter 75,3 ppm, d.h. Zink ist vor dem Sommerdamm dreimal höher konzentriert. Die Zinkgehalte des Ober- und Unterbodens zeigen wie die Chromgehalte auch hinter

Tab. 1. Übersicht über die Mäandersysteme des Rheins, deren zeitliche Einordnung sowie verbreitete Bodentypen und deren Eigenschaften

Ms. Nr.	vorbereitete Bodentypen	Beginn der Entstehung in Jahren vor heute	Datierungshinweis	vorherrschende Bodenart	Carbonatgehalt des Auenlehms im Untersuchungsgebiet	Gehalt org. C des Auenlehms im Untersuchungsgebiet	pH-Wert des Auenlehms im Untersuchungsgebiet
1	Braune Auenböden mit Übergängen bis zum Auengley	90–100	Buhnenbau gegen Ende des 19. Jh. (SPIESS 1951)	Lu–Ltu	16–29%	1,1–4,5%	7,1–7,6
2	Braune Auenböden mit Übergängen bis zum Auengley	1500	römische Hafenanlage im Steiner Wald (THIEMEYER 1989a)	Lu–Ltu	17–22%	1,1–3,6%	7,4–7,6
3	Braune Auenböden mit Übergängen bis zum Auengley, örtlich Auenpelosole – (Braune Auenböden)	2500	Pollenanalyse im verlandeten Altlauf (SCHARPFF 1977)	Lu–Ltu	18–20%	0,6–3,3%	7,3
4	Auenpelosole mit Übergängen bis zum Auengley	ca. 3800	neolithischer Grabfund (SCHARPFF 1977)	Tu, Lt, Ltu	0–4,0%	3,0–4,4%	7,0–7,2
5	Graue Auentschernoseme, Auenparabraunerden	8000–9000	klimatische Deutung der Bodenbildung (ZAKOSEK 1962)	Ls4	0,1–1,3%	0,5–1,7%	7,0–7,3

dem Sommerdamm größere Schwankungen. Auch hier werden die höchsten Werte in Mäandersystem 4 erreicht.

Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, daß die verschiedenen Schwermetalle in unterschiedlichem Maße durch den Rhein eingetragen werden. Durch den Vergleich von Schwermetallkonzentrationen vor und hinter dem Sommerdamm können v.a. Blei, Cadmium, Chrom und Zink als durch den Rhein abgelagerte Schwermetalle angesprochen werden. Kupfer hat zwar auch vor dem Sommerdamm ein Maximum, die Unterschiede zu den Konzentrationen hinter dem Sommerdamm sind jedoch weniger deutlich. Die Arsen- und Nickelgehalte sind im Gegensatz zu den anderen Schwermetallen in geringem Maße durch den Rhein verursacht.

Die Ursachen für den unterschiedlichen Einfluß des Rheins auf den Schwermetalleintrag in die Aue können durch die verschiedenen Schwermetalltransportmengen und die Transportart erklärt werden (vgl. MALLE 1985, 1988, 1990, Deutsche Kommission zur Reinhaltung des Rheins 1989).

Nach MALLE (1990) werden die Schwermetalle Blei und Chrom vorwiegend an Feststoffe gebunden, d.h. mit dem Schwebstoff, transportiert. Dies hat zur Konsequenz, daß bei Hochwasser insbesonders diese Metalle in der Aue sedimentiert werden können.

Arsen und insbesondere Nickel liegen dagegen hauptsächlich in Lösung vor und werden somit kaum in der Aue abgelagert.

Zink, welches zwar auch hauptsächlich in Lösung vorkommt, ist jedoch in so großen Mengen im Rhein vorhanden, daß es zu einer hohen Belastung der Auengebiete beiträgt.

Cadmium ist hinsichtlich seiner Transportmenge mit den anderen Schwermetallen nicht vergleichbar (vgl. Deutsche Kommission zur Reinhaltung des Rheins 1989), da es in wesentlich geringeren Mengen im Rheinwasser vorhanden ist. Da es aber trotzdem in besonders hoher Konzentration ausschließlich vor dem Sommerdamm auftritt, kann es als *das Indikatorelement* für den fluviatilen Schwermetalleintrag angesehen werden.

6. Beurteilung der Schwermetallgehalte

6.1. Beurteilung der Schwermetallgehalte nach bestehenden Grenz- und Richtwerten

Um den verschiedenen Nutzungsvarianten der Flächen in der Rheinaue gerecht zu werden, werden die Gebiete vor dem Sommerdeich anhand nutzungsorientierter Bodenwerte (EIKMANN & KLOKE 1991) beurteilt. Als Bewertungsmaßstab der land-

einwärts liegenden landwirtschaftlich genutzten Flächen dienen die Werte der Klärschlammverordnung sowie die Richtwerte der „Niederländischen Liste".

6.1.1. Die Flächen vor dem Sommerdeich

Tab. 2 zeigt die Schwermetallgehalte der Beprobungspunkte vor dem Sommerdeich im Vergleich zu nutzungsorientierten Bodenwerten nach EIKMANN & KLOKE (1991).

Tab. 2. Die Flächen vor dem Sommerdamm im Vergleich mit nutzungsorientierten Bodenwerten nach EIKMANN & KLOKE (1991) (Angaben in ppm)

	Arsen	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Blei	Zink
a_1	40	5	200	50	100	1000	300
a_2	60	10	500	200	200	2000	600
c	14,8	1,6	76,0	32,4	39,5	72,6	232,2
d	17	2,5	89	42	48	93	323
e	26	9,8	261	96	53	113	491

a Orientierungswerte nach EIKMANN & KLOKE (1991) für nicht agrarische Ökosysteme
1 = BW II, Schutzgut- und nutzungsorientierter Wert, der die normale Lebens- und Leistungsfähigkeit auch langfristig nicht beeinträchtigt (Unbedenklichkeitswert)
2 Gehalt im Boden, bei dem Schäden an Schutzgütern wie Pflanze, Tier und Mensch erkennbar werden (Toxizitätswert)
c durchschnittliche Gehalte der Oberböden vor dem Sommerdeich
d Maximumgehalte der Oberböden vor dem Sommerdeich
e Maximumgehalte der Unterböden vor dem Sommerdeich

Daraus wird ersichtlich, daß sowohl die durchschnittlichen als auch die maximalen Schwermetallgehalte der Oberböden unter den von EIKMANN & KLOKE (1991) als ‚tolerierbar' eingestuften Konzentrationen für nicht agrarische Ökosysteme liegen.

Ein anderes Bild zeigen die Maximalgehalte der Unterböden. Hier werden die tolerierbaren Werte bei den Metallen Cadmium, Chrom, Kupfer und Zink teilweise um das Doppelte übertroffen. Am deutlichsten wird dies bei Cadmium, wo mit 9,8 ppm schon annähernd die Toxizitätsschwelle erreicht ist.

6.1.2. Die Flächen hinter dem Sommerdeich

In Tab. 3 sind die durchschnittlichen und maximalen Schwermetallgehalte der Ap-Horizonte (Pflughorizonte) den Grenz- bzw. Richtwerten von Deutschland, der Niederlande und Schweiz gegenübergestellt. Die Grenzwerte der Klärschlammverordnung sowie die Richtwerte der Schweiz werden bis auf das Element Nickel durch keines der untersuchten Schwermetalle erreicht.

Tab. 3. Schwermetallgehalte der landwirtschaftlich genutzten Flächen hinter den Deichen im Vergleich zu bestehenden Grenz- und Richtwerten (Angaben in ppm)

	Arsen	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Blei	Zink
a	*20	1,5	100	60	50	100	200
b	29	0,8	100	36	35	85	140
c	–	0,8	75	50	50	50	200
d	14,8	0,21	45,8	20,3	35,4	34,0	75,3
e	18	0,3	65	27	42	40	99

a Grenzwerte der Klärschlammverordnung * = tolerierbarer Richtwert nach KLOKE (1989)
b Richtwerte der Niederlande
c Richtwerte der Schweiz
d durchschnittliche Gehalte der Oberböden (Ap-Horizonte)
e Maximumgehalte der Oberböden (Ap-Horizonte)

6.2. Prognose der Empfindlichkeit der Böden des Untersuchungsbietes gegenüber Schwermetallbelastungen

Anhand eines Bewertungsverfahrens des DVWK (1988), welches von BLUME & BRÜMMER (1987) entwickelt wurde, kann eine Prognose der Empfindlichkeit von Böden gegenüber Schwermetallbelastungen vorgenommen werden. Prinzip dieses Verfahrens ist die Ermittlung der relativen Bindungstärke für Schwermetalle in Abhängigkeit des pH-Wertes der Bodenlösung ausgehend von einem sorptionsschwachen, humusarmen Sandboden. Je nach Höhe des pH-Wertes werden den verschiedenen Schwermetallen Wertezahlen zugeordnet. Da höhere Humusgehalte, Ton oder Eisenoxidgehalte die Adsorption von Schwermetallen positiv beeinflussen, werden sie durch Zuschläge berücksichtigt.

In die Bewertung geht außerdem das differierende Adsorptionsverhalten verschiedener Schwermetalle ein. Das detaillierte Verfahren ist in DVWK (1988) beschrieben.

Hoch belastete Standorte können nach dem Verfahren des DVWK (1988) nicht beurteilt werden, da hier Wechselwirkungen zwischen einzelnen Metallen auftreten können. Allgemein nimmt die Mobiltät und die Verfügbarkeit von Schwermetallen mit steigender Konzentration zu.

Das Ergebnis ist die Ermittlung der relativen Bindungstärke für jedes Schwermetall anhand einer fünfstufigen Skala:
1 = sehr geringe Bindung
2 = geringe Bindung
3 = mittlere Bindung
4 = starke Bindung
5 = sehr starke Bindung

Aufgrund der Bodeneigenschaften (pH-Werte im neutralen Bereich, Tongehalte und Gehalte an org. Substanz, s. Tab. 1) ergeben sich für die untersuchten Ele-

mente Cadmium, Blei, Chrom, Kupfer, Nickel, Zink starke bis sehr starke Bindungen (Bewertungszahlen 4–5). Dies bedeutet, daß unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften Schwermetalle in relativ festen Bindungsformen vorliegen und somit wenig pflanzenverfügbar bzw. mobil sind.

Bei den hochbelasteten Standorten vor dem Sommerdeich muß jedoch auf Grund der hohen Cadmium-, Zink- und Chromgehalte mit einer zunehmenden Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit gerechnet werden. Um gesicherte Aussagen treffen zu können wären hier weitere Untersuchungen in Form von Bodenwasser- oder Pflanzenanalysen notwendig.

6.3. Unterscheidung von geogenen und anthropogenen Schwermetallgehalten
Schwermetallgehalte in Böden setzen sich aus einem natürlich vorhanden (geogenen) und einem durch den Menschen verursachten (anthropogenen) Anteil zusammen.

Natürliche Schwermetallquellen sind die Gesteine bzw. bei Auenböden fluviatile Sedimente. Die Schwermetallgehalte in den Ausgangssubstanzen bilden den lithogenen Anteil. Im Laufe der Bodenbildung können aus den Ausgangsmaterialien oder innerhalb des Bodenprofils Schwermetalle freigesetzt werden. Sie bilden den pedogenen Anteil. Pedogene und lithogene Schwermetallgehalte stellen den geogenen Grundgehalt dar.

Zur Bilanzierung des geogenen Anteils wird ein Verfahren nach RUPPERT (1988) angewendet, der Schwermetallgehalte in Auenböden des Donautales untersuchte. Dort konnten bei den meisten Beprobungsstellen Schwermetallanreicherungen im Oberboden festgestellt werden. Dies ist auch bei den Tiefenverteilungen (vgl. Kap. 4) im Untersuchungsgebiet gegeben. Aufgrund der günstigen Bodeneigenschaften kann davon ausgegangen werden, daß Schwermetalle in den Oberböden weitgehend festgelegt sind und damit die Unterböden von anthropogenen Verunreinigungen unbeeinflußt sind. Weiterhin ist durch die Datierungen (vgl. Kap. 3) gewährleistet, daß die Gebiete der Rheinaue, außer Mäandersystem 1, aus Sedimenten vorindustrieller Zeit aufgebaut werden. Diese Kriterien werden von den Profilen 5 bis 19 erfüllt. Somit können über den Vergleich der Unterboden- und Oberbodengehalte Anreicherungsfaktoren ermittelt werden (vgl. Tab. 4).

Tab. 4 unterstreicht die bereits in Kap. 5 dargestellten Beobachtungen (vgl. auch Abb. 8). Die Anreicherungsfaktoren vor dem Sommerdeich liegen i.d.R. über denen der landeinwärts liegenden landwirtschaftlichen Flächen. Besonders deutlich wird dies bei den Elementen Cadmium, Chrom und Zink. Bei den Cadmiumgehalten hinter dem Sommerdeich tritt in einem Fall auch ein Anreicherungsfaktor über dem Faktor 10 auf. Jedoch liegen hier die Konzentrationen nahe der Nachweisgrenze, so daß dieser Wert mit Vorsicht interpretiert werden muß. Nickel und

Tab. 4. Anreicherungsfaktoren zwischen Ober- und Unterboden

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
MS 2 (vor dem Sommerdeich)							
Profil 5	1.43	>10.00	2.03	2.14	1.13	1.70	2.39
Profil 6	1.21	8.00	2.34	2.33	1.05	1.81	2.74
Profil 7	0.94	13.00	2.79	1.33	1.21	2.51	3.19
MS 2 (hinter dem Sommerdeich)							
Profil 8	1.23	1.50	1.30	0.71	1.11	1.57	1.55
Profil 9	1.20	3.00	1.09	1.14	0.97	1.12	1.12
MS 3							
Profil 10	1.04	2.00	0.86	1.10	0.88	1.21	1.05
Profil 11	1.00	–	0.99	1.09	0.98	1.24	1.07
Profil 12	1.08	2.00	0.70	1.00	0.95	1.17	1.07
Profil 13	0.93	>10	1.02	1.29	1.05	1.08	1.14
MS 4							
Profil 14	1.23	>10.00	1.20	1.47	1.19	1.25	1.60
Profil 15	1.00	–	1.11	1.12	1.06	1.28	1.25
Profil 16	0.48	2.00	0.94	1.08	0.95	1.33	1.18
MS 5							
Profil 17	1.11	–	0.90	1.30	0.95	1.78	1.53
Profil 18	1.27	<1.00	1.23	1.36	1.24	1.32	1.43

MS = Mäandersystem

Tab. 5. Geogene Schwermetallgehalte in den verschiedenen Rheinmäandersystemen (MS 1-5) (Angaben in ppm)

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
MS 2 (Lu-Ul 4)	13.4	0.07	28.5	16.1	32.7	34.1	59.0
MS 3 (Ltu-Tu 2)	13.8	<0.1	44.2	20.5	41.7	33.4	71.1
MS 4							
(Lu)	13.0	<0.1	60.5	19.0	39.0	26.5	67.5
(Ltu)	12.4	<0.1	48.1	13.2	31.8	22.6	46.6
(Tu 2)	24.0	<0.1	69.0	24.0	44.0	30.0	84.0
MS 5 (Ls 4)	9.0	<0.1	41.7	8.7	18.3	12.7	29.7

Lu schluffiger Lehm
Ltu schluffig-toniger Lehm
Tu2 schwach schluffiger Ton
Ul4 stark lehmiger Schluff
Ls 4 stark sandiger Lehm

Arsen zeigen im gesamten Auenquerschnitt relativ geringe Anreicherungsfaktoren um 1, d.h. die Gehalte dieser Elemente liegen im geogenen Bereich.

In Tab. 5 werden für die verschiedenen Substrate der Mäandersysteme 1–5 aus den Schwermetallgehalten im Unterboden Durchschnittswerte berechnet. Sie bilden

die geogen zu erwartenden Grundgehalte. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß die Datenbasis für diese Berechnungen z. T. sehr gering ist. Die hier angegebenden Werte sollen daher Anhaltspunkte darstellen, die es durch weitere Untersuchungen zu bestätigen bzw. zu korrigieren gilt.

7. Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung zeigt, daß die Verteilung der Schwermetalle in der Rheinaue weniger durch das unterschiedliche Verteilungsmuster der Bodenformen als durch die unterschiedliche Überflutungssituation beeinflußt wird. Demnach kann als die Grenze für einen fluviatilen Schwermetalleintrag der Sommerdamm angesehen werden.

Hinter dem Sommerdamm ist v.a. mit einem Eintrag von Schwermetallen durch die Landwirtschaft bzw. durch atmosphärische Deposition zu rechnen. Da zwischen Beprobungspunkten vor und hinter dem Winterdamm nur geringe Konzentrationsunterschiede auftreten, scheint dieser auf die Verteilung von Schwermetallen nur einen unwesentlichen Einfluß zu haben.

Vor dem Sommerdamm können hoch belastete Bereiche in Rheinaltarmen, ehemaligen Flußrinnen sowie v.a. zwischen den Buhnen erwartet werden. Hinter dem Sommerdamm sind die Schwankungen der Schwermetallgehalte geringer. Belastungsspitzen sind hier wahrscheinlich auf landwirtschftliche Einträge zurückzuführen.

Nicht alle Schwermetalle werden im gleichen Maße durch den Rhein eingetragen. Dies wird durch den Vergleich von Schwermetallgehalten vor und hinter dem Sommerdamm deutlich. Vor allem Zink, Cadmium und Chrom können als durch die Rheinverschmutzung verursachte Schwermetalle angegeben werden. Nickel und Arsen dagegen werden nur in geringem Maße durch den Rhein in die Aue eingetragen.

Da das Untersuchungsgebiet hinsichtlich der vorhanden Bodenformen und des Deichsystems einen typischen Landschaftsausschnitt der holozänen Rheinaue darstellt, können die Ergebnisse als charakteristisch für die gesamte nördliche Oberrheinebene gesehen werden. Mit der Konzeption dieser Untersuchung (Berücksichtigung des Dammsystems, der Überflutungshäufigkeiten, des Verteilungsmusters der Bodenformen und Auenmorphologie) liegt somit ein Instrument vor, nach dem auch größere Flußabschnitte untersucht werden können. Zur statistischen Absicherung dieses Befundes wären jedoch weitere Beprobungen erforderlich.

Das Niveau der Schwermetallbelastung kann nach bestehenden Grenz- und Richtwerten berurteilt werden. Die Konzentrationen auf den Flächen hinter dem Som-

merdeich liegen unter den in Deutschland geltenden Werten der Klärschlammverordnung. Die Belastungsschwerpunkte vor dem Sommerdeich überschreiten diese Werte jedoch um ein mehrfaches.

Auf Grund der positiven Bodeneigenschaften kann davon ausgegangen werden, daß Schwermetalle in relativ stabilen Bindungsformen vorliegen. Ob dies auch für die hoch belasteten Bereiche in Flußnähe gilt, müßte durch weitere Untersuchungen belegt werden.

Eine Bilanzierung von geogenen und anthropogenen Schwermetallgehalten kann über den Vergleich von Ober- und Unterbodengehalten vorgenommen werden. Dabei zeigt sich, daß die Schwermetallgehalte auf der landwärtigen Seite der Deiche nahezu im geogenen Bereich liegen.

8. Schriftenverzeichnis

Arbeitsgruppe Bodenkunde (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 331 S., 19 Abb., 98 Tab., 1 Beil.; Hannover (Schweizerbarth).

BLUME, H.P. (Hrsg.) (1990): Handbuch des Bodenschutzes. – 686 S., div. Abb., div. Tab.; Landsberg/Lech (Ecomed).

– & BRÜMMER, G. (1987): Prognose des Verhaltens von Schwermetallen in Böden mit einfachen Feldmethoden. – Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., **53**: 111–117, 9 Tab.

CLAUSSEN, T. (1983): Überschwemmungsgebiet des Niederrheins schwermetallverunreinigt. – Wasser und Boden, **35**: 536–538; Hamburg – Berlin.

Deutsche Kommission zur Reinhaltung des Rheins (1991): Rheinbericht 1990. – Düsseldorf (P & W Druck und Verlag GmbH).

DVWK (1988): Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen, Teil 1: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. – Merkblätter zur Wasserwirtschaft, **212**/1988, 8 S., 11 Taf.; Hamburg – Berlin (Paul Parey).

EIKMANN, TH. & KLOKE, A. (1991): Nutzungs- und schutzbezogene Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden. – Mitt. VDLUFA., Sonderdruck aus Heft **1**/1991; Darmstadt.

JAPENGA, J., ZSCHUPPE, K.H., DE GROOT, A.J., & SALAMONS, W. (1990): Heavy metals and their micropollutants in floodplains of the river Waal, a distributary of the river Rhine, 1958–1981. – Netherlands Journal of Agricultural Science, **38**: 381–397, 10 Abb., 6 Tab.

KLOKE, A. (1989): Zur Problematik und Begründung von Schwellenwerten für Schwermetalle in Böden. In: BEHRENDS, W., WIESNER J. (Hrsg.): Beurteilung von Schwermetallkonzentrationen im Boden, S. 77–86; Frankfurt a.M. (Dechema).

KÖNIG, W., & KRÄMER, F. (1985): Schwermetallbelastung von Böden und Kulturpflanzen in Nordrhein-Westfalen. – Schriftenreihe der LÖLF Bd. **10**, 160 S., 34 Abb., 63 Tab.; Recklinghausen.

MALLE, K.H. (1985): Metallgehalt und Schwebstoffgehalt im Rhein II. – Zeitschr. f. Wasser- und Abwasserforsch., **18**: 207–209, 1 Abb., 4 Tab.; Weinheim.

– (1988): Die Bedeutung der Hintergrundbelastung bei der Bilanzierung der Metallfrachten im Rhein. – Zeitschr. f. Wasser- und Abwasserforsch., **21**: 20, 2 Tab.; Weinheim.

– (1990): Metallgehalt und Schwebstoffgehalt im Rhein. – Zeitschr. f. Wasser- und Abwasserforsch., **23**: 204–208, 2 Abb., 8 Tab.; Weinheim.

MÜLLER, G. (1988): Die Schwermetallbelastung größerer Flüsse in der Bundesrepublik Deutschland und des Bodensees: Ausmaß und zeitliche Entwicklung. – In: Gefährdung und Schutz von Gewässern, Tagung über Umweltforschung an der Universität Hohenheim, S. 19–34, 2 Abb., 11 Tab.; Stuttgart.

MÜLLER, G., & YAHYA, A. (1992): Schadstoffbelastung in Böden von Hochwasserüberflutungsflächen des Rheins, Literaturstudie und Zusammenstellung vorhandener Untersuchungen im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz. – 144 S., 45 Abb., 21 Tab.; Mainz.

RUPPERT, K. (1988): Schwermetallgehalte in Böden des Donautales. – GLA Fachberichte **4**, Bayrisches Geol. Landesamt; München.

SALAMONS, W., & DE GROOT, A.J. (1978): Pollution history of Trace Metals in Sediment, as effected by the Rhine river. – Environmental Biogeochemnistry, **1**: 149–162, 5 Abb., 3 Tab.

SCHARPFF, H.J. (1977): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25000 Blatt Nr. 6316 Worms. – 282. S., 42 Abb., 5 Tab.; Wiesbaden.

SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. – 491 S., 220 Abb., 102 Tab., 1 Taf.; Stuttgart (Enke).

SPIESS, K. (1951): Ausbau des Rheines vom Bodensee bis zum Main. – In: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Duisburg (Hrsg.): Der Rhein; Duisburg (Rhein-Verlagsgesellschaft mbH).

THIEMEYER, H. (1989): Schwermetallgehalte von typischen Böden einer Toposequenz im Hessischen Ried. – Geoökodynamik **10**: 47–63, 8 Abb., 1 Tab., 11 Prof.; Bensheim.

– H. (1989a): Aufbau und Eigenschaften typischer Böden im Hessischen Ried. – Geol. Jahrbuch Hessen, **117**: 217–236, 4 Abb., 7 Tab., 6 Prof.; Wiesbaden.

WEIDNER, E. (1990): Bodenkarte der nördlichen Oberrheinebene 1: 50000; Wiesbaden.

ZAKOSEK, H. (1962): Zur Genese und Gliederung der Steppenöden im nördlichen Oberrheintal. – Abh. Hess. L.-Amt Bodenforsch., **37**, 46 S., 1 Abb., 19 Tab.; Wiesbaden.

Anschrift des Autors:
Dipl.-Geogr. ULRICH DEHNER
Georg August Str. 8
65195 Wiesbaden

Manuskript eingegangen am 10. 3. 1995